

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE MODOS DE FALHA EM PLACAS DE AÇO APARAFUSADAS

Mário J. Pereira¹, Elza M. Fonseca^{1*} e Luísa M. Barreira¹

1: Engenharia Mecânica
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
5301-857 Bragança
e-mail: efonseca@ipb.pt web: <http://www.ipb.pt>

Palavras-chave: ligação metálica, resistência mecânica, modo de falha, modelo numérico e experimental.

Resumo. *Neste trabalho será apresentado um modelo numérico utilizando o software Ansys para estudo não linear do comportamento de placas em aço, aparafusadas, quando submetidas a esforços para além da sua capacidade elástica. Serão utilizados elementos finitos sólidos e de contacto, que permitirão obter resultados dos modos de falha que ocorrem nas juntas aparafusadas sobrepostas. Serão apresentados resultados experimentais em placas com as mesmas características. Os modos de falha obtidos nos ensaios realizados, permitirão observar a resistência última das ligações, e comprovar que a resistência ao corte nas ligações, aumenta com o aumento do comprimento da zona lisa do parafuso.*

1. INTRODUÇÃO

As ligações aparafusadas desempenham um papel fundamental no comportamento global de estruturas metálicas. O desempenho dum ligação aparafusada pode tornar-se complexa atendendo a que vai estar sujeita a um campo de tensões, função dos materiais constituintes dessa ligação e respectivas solicitações. Com o objectivo de estudar o comportamento real das ligações e verificar a sua influência na resistência global das estruturas, têm sido publicados trabalhos [1-2] que contribuem para uma verificação da regulamentação disponível [3] para este efeito. Tradicionalmente o dimensionamento de ligações metálicas baseava-se na verificação da sua capacidade resistente. Nos últimos anos e com a utilização de modelos computacionais, é possível efectuar estudos mais complexos através da simulação do comportamento real das ligações utilizando o método dos elementos finitos. Neste trabalho será apresentado um estudo comparativo entre a utilização de um modelo numérico não linear e os resultados experimentais obtidos no estudo de várias ligações aparafusadas.

2. MODELO NUMÉRICO

O modelo numérico foi realizado através do programa Ansys. As placas de aço aparafusadas foram simuladas através do elemento finito sólido *Solid45*. Este elemento estrutural 3D possui 8 nós e três graus de liberdade por nó. É um elemento preparado para modelação plástica com grandes deformações e deslocamentos. Foi ainda utilizado um elemento finito para o contacto entre superfícies *Conta174* e *Targe170*, respectivamente para a superfície de contacto e superfície alvo. É também um elemento estrutural 3D com propriedades físicas idênticas, de 8 nós, sendo utilizados na análise de contacto entre superfícies rígida-flexível ou flexível-flexível. Este elemento está preparado para a modelação entre corpos sólidos ou cascas. No caso em estudo, este elemento par de contacto, será definido entre as superfícies das placas e os elementos de ligação.

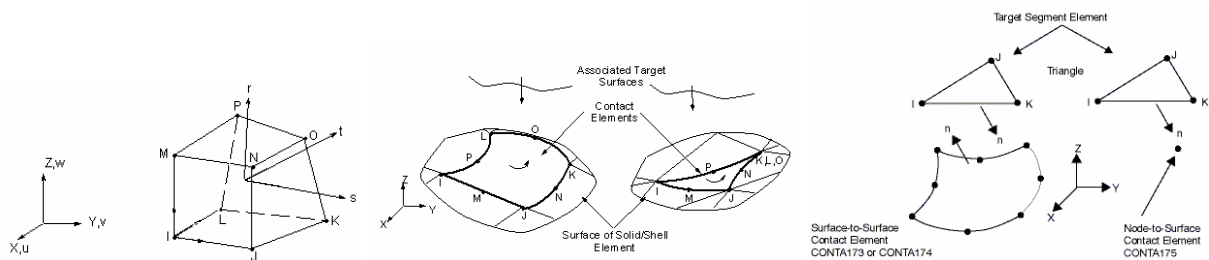


Figura 1. Elemento *Solid45*, elemento *Conta174* e *Targe170* do Ansys.

Foi efectuada uma modelação não-linear, utilizando a curva tensão-deformação, elástica perfeitamente plástica do material, determinada previamente em ensaios. Implementou-se uma relação incremental da carga para que o modelo resistisse à maior solicitação possível, até manter o equilíbrio e se observasse o comportamento plástico da estrutura.

3. MODELO EXPERIMENTAL

Para a realização dos ensaios previstos, foram consideradas duas etapas distintas: a análise das propriedades do material e a medição experimental dos deslocamentos função do carregamento imposto na ligação, até ao limite de rotura de cada placa.

3.1. Propriedades mecânicas das placas

Para a verificação das propriedades mecânicas do material foram efectuados vários ensaios de tracção em provetes normalizados à temperatura ambiente segundo a norma NP EN10002-1. A figura 2 representa as fases de execução dos ensaios de tracção e obtenção das respectivas curvas do material tensão deformação.

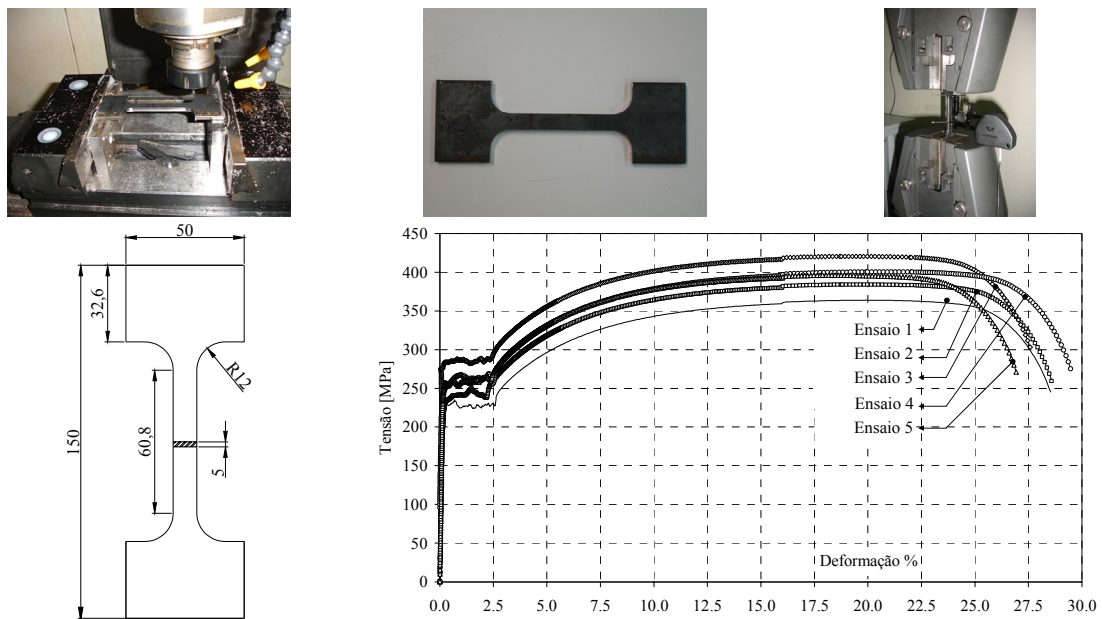


Figura 2. Sistema experimental utilizado na análise das propriedades mecânicas.

Com base nos resultados obtidos, registaram-se as propriedades mecânicas de forma resumida na tabela 1. Os valores médios obtidos nestes ensaios são utilizados no modelo numérico para a curva de material da placa em aço.

Provete N°	Módulo de Elasticidade [GPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão Última [MPa]
1	207.13	229.57	363.86
2	206.47	217.71	384.09
3	210.37	281.83	420.44
4	208.99	245.14	400.41
5	190.33	255.27	396.07
Média	204.66	245.90	392.97

Tabela 1. Resultados dos ensaios.

3.2. Propriedades e características dos parafusos

As características mecânicas dos parafusos das ligações metálicas em estudo pertencem à classe 8.8, em que a tensão de cedência vale 640 [MPa] e a tensão última 800 [MPa]. A resistência de um parafuso pode ser avaliada através da sua secção resistente à tracção, sendo a zona mais fraca de um parafuso a parte roscada.

A rotura de uma ligação pode ocorrer em função de um dos seguintes modos de falha: corte no parafuso, esmagamento da placa de ligação ou rotura em bloco. Os valores de dimensionamento da resistência ao corte e ao esmagamento são obtidos com base no Eurocódigo EN1993-1-8 [3]. O modo de rotura depende das dimensões da ligação e da resistência entre o material dos parafusos e o material das partes a ligar.

3.3. Placas de aço aparafusadas

Foram efectuados ensaios em 12 placas de aço ligadas através de elementos aparafusados. As dimensões utilizadas nas ligações metálicas são as apresentadas na figura 3. O dimensionamento de toda a ligação foi efectuado segundo o Eurocódigo [3]. Os elementos de ligação também foram devidamente dimensionados, tendo-se optado por 6 ligações com parafusos completamente roscados e outras 6 com parafusos que incluem parte lisa.

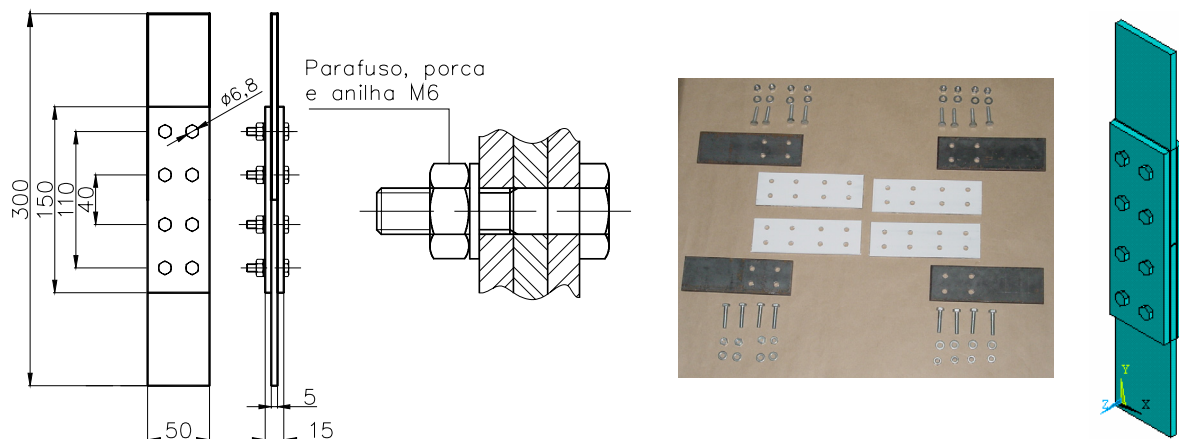


Figura 3. Geometria das placas aparafusadas: modelo experimental e numérico.

4. RESULTADOS

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios universal, com o objectivo de identificar o valor da carga máxima de rotura nas várias ligações. A figura 4 representa o modo de rotura nos dois tipos de placas utilizadas. Quando a ligação é roscada a rotura devido ao corte acontece nas duas primeiras linhas de parafusos. Nas ligações em que os parafusos têm uma parte lisa a tendência registada ao corte verifica-se nas placas. Na figura 4 verifica-se ainda uma semelhança no modo de deformada obtida com os resultados numéricos.

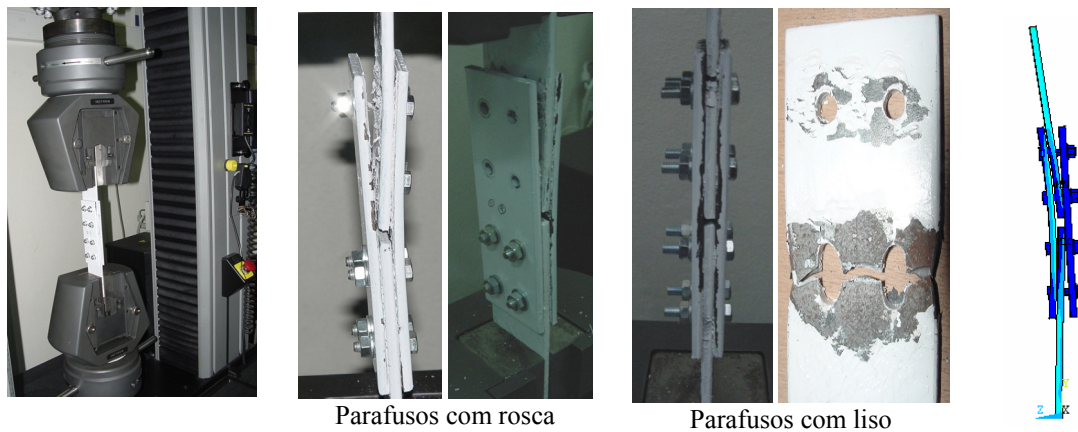


Figura 4. Ensaio e modo de rotura nas placas aparafusadas. Solução numérica.

A figura 5 representa o campo de tensão equivalente obtido com o programa Ansys para diferentes incrementos de carga. Pode-se observar o nível de tensões crítico na zona dos furos nas placas. Também o campo de tensões nos parafusos vai aumentando de acordo com o incremento de carga sendo máximo nas zonas em que existirá corte. A carga máxima atingida na análise não linear efectuada foi de 76,9 [kN].

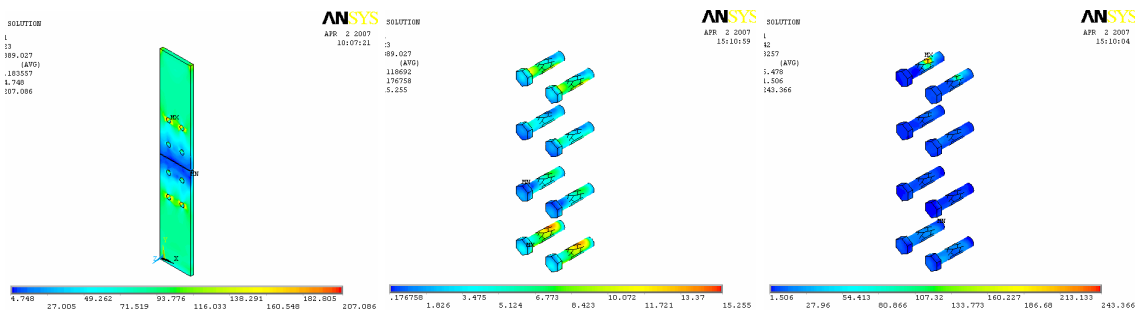


Figura 5. Estado de tensão equivalente para diferentes incrementos de carga.

A figura 6 representa os registos dos ensaios força e deslocamento, efectuados em 6 placas com parafusos roscados a) e em outras 6 com parafusos com parte lisa b). Como se verifica, o registo do maior valor da carga de rotura é atingido nos ensaios em que as ligações têm parafusos com parte lisa. Observa-se que o valor da carga máxima atingida nos ensaios em a) permanece nos valores entre 70-80 [kN] e nos ensaios registados em b) o valor aumenta para a gama entre 80-95 [kN]. Verifica-se também que o valor da carga última, atingida no modelo numérico, se situa entre a gama dos valores experimentais obtidos.

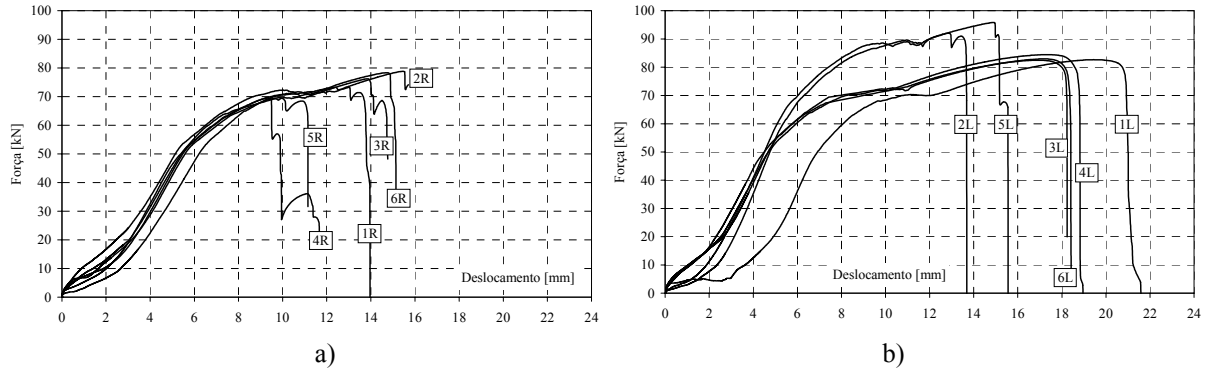


Figura 6. Curva força-deslocamento nas ligações com parafusos roscados (R) a) e lisos (L) b).

A resistência à tracção de um parafuso é condicionada pela fractura na zona roscada e a interacção corte e tracção é considerada na parte lisa do parafuso [1]. De acordo com a figura 7a, a variação da razão resistência ao corte/resistência à tracção é menor se o plano de corte se localiza na zona roscada, sendo maior se o plano de corte se localiza na zona do liso do parafuso. No caso do plano de corte se localizar na zona do liso do parafuso, os dois modos de rotura possíveis são os seguintes: combinação de corte mais tracção no plano de corte e rotura por tracção do parafuso na zona da rosca. Os resultados experimentais obtidos comprovam que a resistência ao corte aumenta no caso da existência de parte lisa nos parafusos. A fórmula de interacção considerada para verificação dos resultados é a proposta no Eurocódigo [3] conforme proposto em [1, 4]:

$$\frac{F_{v,sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,sd}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (1)$$

onde $F_{v,sd}$ representa a resistência ao corte experimental, $F_{v,Rd}$ a resistência ao corte calculada, $F_{t,sd}$ representa a resistência à tracção experimental e $F_{t,Rd}$ a resistência de tracção calculada.

Para avaliar a resistência das ligações aparafusadas, realizou-se um estudo experimental conforme sugerido em [5], apresentado na figura 7b. A resistência máxima das ligações obtida experimentalmente é comparada com a resistência teórica, através do somatório das resistências individuais ao esmagamento de cada parafuso utilizando a expressão seguinte, conforme o Eurocódigo [3]:

$$F_{b,Rd} = \left(\sum \alpha_b k_1 \right) \frac{d t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2)$$

$F_{b,Rd}$ representa a resistência ao esmagamento, α_b é um factor de resistência ao esmagamento, k_1 é um factor de dimensionamento, d representa o diâmetro nominal, t a

espessura da placa, f_u tensão última da placa e γ_{M2} um factor parcial de segurança.

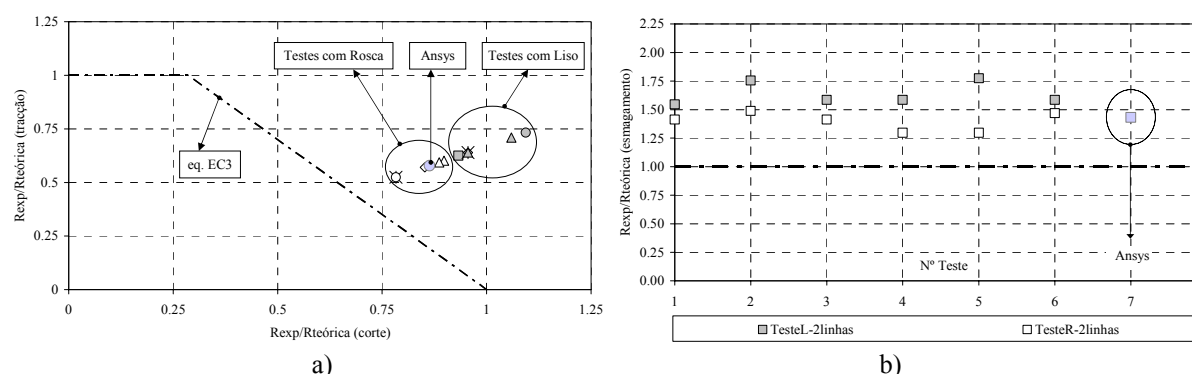


Figura 7. Curva de interacção corte e tracção teórica (a) e resistência ao esmagamento (b).

Os resultados dos ensaios foram comparados com os resultados determinados através dos modelos de dimensionamento definidos no Eurocódigo [3]. As fórmulas para avaliação da resistência ao corte em bloco são conservativas, quando comparadas com os resultados experimentais, como se verifica nos gráficos obtidos. Verificou-se ainda que a resistência das ligações com parafusos roscados é menor que com os parafusos com parte lisa.

5. CONCLUSÕES

O estudo efectuado permite concluir que, em ligações aparafusadas, a presença de parte lisa nos parafusos aumenta a resistência ao corte. Permite ainda verificar, nessas condições, que o modo de rotura pode acontecer nas placas de ligação. Também se verificou que sendo o dimensionamento das ligações efectuado de acordo com o Eurocódigo, as ligações ficarão com uma resistência elevada, pelo que resistirão com segurança em relação aos estados limites últimos propostos.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva L.S., Santiago A., *Manual das Ligações Metálicas*, Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, (2003).
- [2] Sarraj M., Burgess I.W., Davison J.B., Plank R.J. *Finite Element Modelling of Fin Plate Steel Connections in Fire*, SIF'06, Proceedings of the 4th international workshop – Structures in Fire, Vol.1, pp 315-326, (2006).
- [3] [EN 1993-1-8] prEN 1993-1-8. Eurocode 3: *Design of Steel Structures*, Part 1.8: Design of Joints, European Standard, CEN, Brussels, (2002).
- [4] Owens G.W., Cheal B.D., *Structural Steelwork Connections*, Butterworths, London, (1988).
- [5] Kouhi J., Kortessmaa M., *Strength tests on bolted connection using high-strength steels (HSS steels)*, VTT Research Notes 1185, 1990).